基于极端顶点混料设计优化黄粉虫秸秆饲料配方

李小龙，熊晓莉，李 宁*

（重庆工商大学环境与资源学院，重庆 400067）

摘要：【目的】每年产生的秸秆大部分没有被有效利用，造成大量的资源浪费。虽有部分秸秆发酵后制成畜禽动物饲料，但研究秸秆饲料用于饲养昆虫的少见。本研究旨在拓展秸秆的资源化利用途径，利用发酵秸秆饲养黄粉虫 *Tenebrio molitor*，进而降低黄粉虫饲养中的饲料成本。【方法】以饲养黄粉虫的常规饲料、发酵的玉米秸秆、发酵的红薯秸秆为原料，用极端顶点混料设计法，研究三者不同混合比例对黄粉虫幼虫生长指标（生物量增率、死亡率、体长、饲料利用率和转化率）以及生理指标［含水量、灰分含量、粗脂肪含量、粗蛋白含量、超氧化物歧化酶（SOD）活性、总糖含量、磷含量、中微量元素含量和重金属含量］的影响，筛选出黄粉虫的最佳混料配方。【结果】结果表明，在常规饲料中添加一定量发酵的玉米秸秆和红薯秸秆更有利于黄粉虫幼虫的生长。生物量增率较大的实验组，其饲料利用率和转化率较高。混料配方中红薯秸秆所占比例越大，黄粉虫幼虫的死亡率趋势越大。而不同的混料配方对黄粉虫幼虫的体长和各生理指标无明显影响。最佳的混料配方为：常规饲料∶发酵玉米秸秆∶发酵红薯秸秆＝37.24∶20.72∶42.04。此配方饲料成本低，相比于常规饲料配方成本降低了 56.94%。此配方下饲养的黄粉虫幼虫，其生物量增率可达 32.52%，高于常规饲料饲喂的对照组（25.17%），且黄粉虫幼虫的死亡率低、饲料利用率高。【结论】秸秆饲料经过科学配方既降低了黄粉虫的饲养成本，又提高了秸秆的利用率，具有较好的推广前景。

关键词：黄粉虫；秸秆；饲料；饲料配方；极端顶点混料设计

中图分类号：Q965 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2018)05-0596-08

Formulation optimization of crop straw feed of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) based on extreme vertex mixing design method

LI Xiao-Long, XIONG Xiao-Li, LI Ning* (College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: 【Aim】A large quantities of crop straws produced annually are not effectively used, causing waste of resources. Some crop straws are fermented into animal feed, but they are rarely adapted as feed of insects. This study aims to extend the utilization of crop straw and to reduce the feed cost for breeding *Tenebrio molitor*. 【Methods】Different feed formulas made from the conventional feed of *T. molitor*, fermented corn stalk and fermented sweet potato straw were designed by extreme vertex mixing design method, and the optimal feed formulation was screened by determining the effects of the feed formulation on the growth indexes (biomass increment rate, mortality, body length, feed utilization rate and conversion rate) and physiological indexes (moisture content, ash content, crude fat content, crude protein

基金项目：重庆市高校优秀成果转化资助项目（KJZH17125）；中央财政支持地方高校发展专项资金环境与能源催化创新团队建设项目（渝财教［2017］91 号）；国家首批卓越农林人才教育培养计划项目（教高函［2014］7 号）；重庆市社会民生科技创新专项（cstc2016shmszx80096）

作者简介：李小龙，男，1993 年生，四川自贡人，硕士研究生，研究方向为农业废弃物资源化，E-mail：253611233@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：157020769@qq.com

收稿日期 Received：2017-10-23；接受日期 Accepted：2018-01-29

content, SOD activity, total sugar content, phosphorus content, content of medium and trace elements, and heavy metal content).【Results】The results showed that a certain amount of fermented corn stalk and fermented sweet potato straw added in the conventional feed was more beneficial to the growth of *T. molitor*. In the experimental groups with higher biomass increment rate, *T. molitor* had higher feed utilization rates and conversion rates. The higher the proportion of sweet potato straw in the formula, the higher the mortality trend of *T. molitor*. Different feed formulation had no obvious effect on the body length and physiological indexes of *T. molitor* larvae. The optimal feed formulation for *T. molitor* was as follows: conventional feed∶fermented corn stalk∶fermented sweet potato straw = 37.24∶20.72∶42.04. Compared with the conventional feed formulation, the feed cost of the optimal feed formulation was decreased by 56.94%. The biomass increment rate of *T. molitor* larvae reared with the optimal feed formulation reached 32.52%, higher than that reared with the conventional feed (25.17%). Moreover, the mortality rate of *T. molitor* larvae reared with the optimal feed formulation was low and the utilization of crop straw feed was high.【Conclusion】Based on a reasonable formulation, the crop straw can be used as the feed of *T. molitor*, which can not only reduce the feed cost for breeding *T. molitor*, but also raise the utilization rate of crop straw. So the formulation is of great application prospective.

Key words: *Tenebrio molitor*; crop straw; feed; feed formulation; extreme vertex mixing design

黄粉虫 *Tenebrio molitor* 是一种重要的产业化资源昆虫，被誉为“动物蛋白饲料之王”，具有蛋白含量高、氨基酸配比合理、营养丰富等特点，具有极高的饲用、食用、医用保健价值（李宁等，2017）。然而，我国黄粉虫养殖业发展缓慢，其主要原因在于养殖成本过高，其中黄粉虫的饲料成本占整个养殖成本的70%～90%（王崇均等，2015）。因此，降低其饲料成本势在必行。我国作物秸秆资源丰富，但长期以来大量秸秆被随意堆放、丢弃或焚烧，造成了严重的资源浪费及环境污染。推进秸秆资源化利用，是促进农业可持续发展和解决环境污染问题的重要措施。目前秸秆资源综合利用的途径主要是饲料化、肥料化和能源化，而秸秆饲料化相比于其他利用方式，在资源利用价值上具有优势（楚天舒等，2016）。秸秆中含有大量的蛋白质、纤维素和氮磷等矿物质，利用秸秆饲养黄粉虫，既可增加黄粉虫饲料的来源、节约粮食，又可降低黄粉虫的养殖成本，还提高了秸秆的利用率，减少了秸秆对环境的影响。

目前，秸秆制成牛、羊、鸡等畜禽动物的饲料已有较多的报道（Halidai *et al*., 2016；蒋宏伟等，2017；郭照宙等，2017），但以秸秆为饲料养殖昆虫的研究极少。因畜禽和昆虫有截然不同的口器、消化系统，故不能照搬已有的秸秆饲料制备方法。迄今仅有几篇文献报道了以秸秆饲喂黄粉虫。吉志新等（2011）发现添加适量玉米秸秆养殖黄粉虫，能积累黄粉虫体内的粗蛋白、粗灰分、Ca、P 等指标，但不利于其生长及体内粗脂肪的积累。吕树臣等（2013）发现饲料中添加玉米秸秆的最佳比例为40%，添加玉米秸秆会提高经济效益，但其会降低黄粉虫的平均日增重、粗灰分、粗蛋白等指标。以麦麸∶玉米∶玉米秸秆按1∶1∶1制备的混合饲料，再添加适量青菜叶后饲喂黄粉虫（徐世才等，2013），或以麦麸∶玉米秸秆按2∶3的比例饲养黄粉虫（王春清等，2013），两者均在一定程度提升幼虫体重、粗蛋白等指标，但成本相对较高。且已有报道并未对黄粉虫食用秸秆后的各项生长、生理指标作详细研究。

课题组前期研究发现，仅用未发酵的玉米秸秆作饲养，黄粉虫会出现消化不良、生长缓慢等问题；而以经发酵处理后的玉米秸秆养殖黄粉虫，会比未发酵的效果好，但仍难以达到养殖要求（王崇均等，2015）。若仅用红薯秸秆饲喂黄粉虫，会因水分含量过高导致黄粉虫大量死亡。本研究将秸秆通过微生物发酵处理，转化为黄粉虫可以食用的饲料。本研究以饲养黄粉虫的常规饲料、发酵的玉米秸秆、发酵的红薯秸秆为原料，在充分考虑成本的前提下，用极端顶点混料设计法，研究饲料不同混合比例对黄粉虫生长的影响，并以其生长、生理等为评价指标，筛选出最佳混料配方。

1 材料与方法

1.1 材料来源

玉米秸秆和红薯秸秆（重庆市郊，碎为粒径 2～4 mm 的颗粒）；黄粉虫（大小均一的 5－6 龄幼虫，

实验前停喂 1 d，重庆博乐农业）；常规饲料（麦麸 70%、玉米粉 25%、大豆粉 4.5%、其他共占 0.5% 的比例，市购）；菌种（市购，≥20 亿 cfu/g）。

1.2 秸秆处理

新鲜红薯秸秆 100 份，与 0.5 份酵母混合，发酵袋密封 30 d 即得红薯秸秆饲料。取 100 份风干的玉米秸秆颗粒，混合 5 份的碳酰胺、200 份的混合菌液（白腐菌、嗜热侧孢霉、黑曲霉、米曲霉和里氏木霉等体积混合），于初始温度 35℃下发酵 11 d 后，加入 1 份的活性干酵母，再发酵 1 d 即得玉米秸秆饲料（李宁等，2014）。

1.3 混料试验设计

前期研究发现：当饲料组成中发酵红薯秸秆的添加量超过 80%，黄粉虫的死亡率较高；添加量较低又不利于其生长。通过 Minitab17.1.0 中的极端顶点设计，将红薯秸秆的上、下限分别设置为 0.1 和 0.8；常规饲料和玉米秸秆用量不限。经成本计算，常规饲料的成本为 2.09 元/kg，发酵玉米秸秆为 0.35 元/kg，发酵红薯秸秆为 0.12 元/kg。对常规饲料（X）、玉米秸秆（Y）、红薯秸秆（Z）三者之间设置成本线性约束为 $2.09X + 0.35Y + 0.12Z < 1.36$（1.36 为常规饲料成本的 65%）。以常规饲料、玉米秸秆与红薯秸秆作为混料设计的三因素，得到极端顶点设计随机化生成设计表 1 和布点图 1。

1.4 试虫饲养

选择 1 500 g/份长势良好、大小均一的黄粉虫幼虫，放入养殖盒中饲养，每 3 d 投放一次饲料，每次投料为幼虫重的 20%。饲养 20 d 后，考察黄粉虫的生长和生理指标。同时以常规饲料为对照组（CK）。

表 1 极端顶点设计随机化生成表

Table 1 Randomization table of extreme vertex design

配方编号 Formula no.	标准序 Standard sequence (C1)	运行序 Operating sequence (C2)	点类型 Point type (C3)	区组 Zone group (C4)	常规饲料 Conventional feed (C5)	玉米秸秆 Corn stalk (C6)	红薯秸秆 Sweet potato straw (C7)
1	8	1	-1	1	0.1423	0.2406	0.6171
2	11	2	-1	1	0.4570	0.1406	0.4023
3	7	3	-1	1	0.1423	0.5906	0.2671
4	5	4	1	1	0.6294	0.0000	0.3706
5	9	5	-1	1	0.2423	0.1406	0.6171
6	4	6	1	1	0.5937	0.3063	0.1000
7	1	7	1	1	0.0000	0.9000	0.1000
8	3	8	1	1	0.2000	0.0000	0.8000
9	6	9	0	1	0.2846	0.2813	0.4341
10	2	10	1	1	0.0000	0.2000	0.8000
11	10	11	-1	1	0.4392	0.2938	0.2671

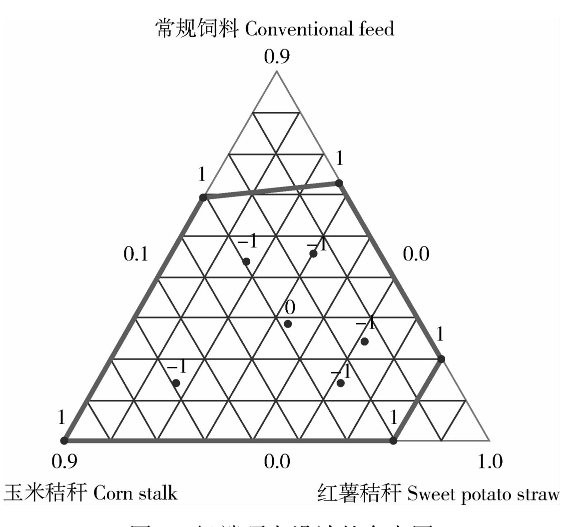


图 1 极端顶点设计的布点图

Fig. 1 Distribution map of extreme vertex design

1.5 混料设计试验结果优化验证

利用 Minitab 软件响应优化器，优化表 1 中的混料比例，按照 1.4 节的步骤饲喂黄粉虫，每组重复 3 次，取平均值，考察黄粉虫的部分生长、生理指标。

1.6 考察指标

1.6.1 生长指标：黄粉虫的生长指标包括幼虫的生物量增率（ΔX_1）（%）、死亡率（D）（%）、幼虫体长（L）（mm）、饲料利用率（ΔX_2）（%）和转化率（ΔX_3）（%）。ΔX_1，D，ΔX_2，ΔX_3 分别按式（1）-（4）计算。

$$\Delta X_1 = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{X_D}{X_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta X_2 = \frac{X_2 - X_1}{X_3 - X_4} \times 100\% \tag{3}$$

$$\Delta X_3 = \frac{X_2 - X_1}{X_3 - X_4 - X_5} \times 100\% \tag{4}$$

式中，X_1：幼虫初始重量（g）；X_2：饲喂后虫体重量（g）；X_D：死虫的重量（g）；X_3：饲料投放量（g）；X_4：饲料剩余量（g）；X_5：饲喂后虫粪重量（g）。

1.6.2 生理指标：黄粉虫的生理指标（生长品质）包括幼虫的含水量、灰分含量、粗脂肪含量、粗蛋白含量、超氧化物歧化酶（SOD）活性、总糖含量、磷含量、中微量元素（K，Zn，Fe，Mn 和 Cu）含量，典型限制指标（重金属）Pb 和 Cr 含量。

黄粉虫的含水量测定参照 GB 5009.3-2016；灰分的测定参照 GB 5009.4-2016；粗脂肪的测定参照 GB 5009.6-2016；蛋白质的测定参照 GB 5009.5-2016。黄粉虫的 SOD 活性采用修改的 Marklund 方法（董海胜和陈斌，2009）测定；总糖含量采用苯酚-硫酸法（孙芸等，2008）测定；磷含量测定采用抗坏血酸-钼蓝分光光度法测定（向晓黎等，2015）；中微量元素和重金属的测定采用火焰原子吸收光谱法（古君平等，2015）。

2 结果

2.1 混料配方对黄粉虫幼虫生长指标的影响

不同混料配方对黄粉虫生长指标的影响如表 2 所示。从表 2 可知，黄粉虫生物量增率最低的分别是 7 号（玉米秸秆 90%）和 10 号（红薯秸秆 80%）配方，表明只添加秸秆饲喂黄粉虫是不可行的，需与常规饲料搭配饲喂。取食 2，4 和 11 号配方的黄粉虫生物量均高于 CK 组，表明在常规饲料中加入一定量的秸秆更有利于黄粉虫生长，且会降低饲料成本。配方中红薯秸秆所占比例越大，黄粉虫的死亡率趋势越大，这与实验前期研究的结果一致。黄粉虫体长受不同混料配方的影响不明显。生物量增率较大的实验组，其饲料利用率和转化率也较高。综上所述，不同混料配方对黄粉虫的生长指标有不同影响。

表 2 不同混料配方对黄粉虫幼虫生长指标的影响

Table 2 Effects of different feed formulation on the growth indicators of *Tenebrio molitor* larvae

配方编号 Formula no.	生物量增率（%） Biomass increment rate	死亡率（%） Mortality rate	体长（mm） Body length	饲料利用率（%） Feed utilization rate	饲料转化率（%） Feed conversion rate
1	34.95	3.10	18.89	32.49	51.43
2	38.06	3.10	20.28	34.09	57.82
3	26.56	2.34	21.26	29.96	65.07
4	41.91	2.92	20.34	35.87	56.51
5	36.15	3.26	20.08	32.70	50.00
6	32.05	2.31	21.05	31.98	68.31
7	13.40	2.52	19.55	23.08	26.95
8	35.00	3.65	20.30	30.58	40.70
9	34.95	2.71	19.74	33.90	59.60
10	10.04	4.05	20.67	9.42	13.20
11	36.31	1.55	20.11	34.95	68.00
CK	36.26	3.55	20.54	32.33	61.78

CK：饲喂 100% 常规饲料 Fed with 100% conventional feed. 配方编号同表 1。The formula no. is the same as in Table 1. 下同 The same below.

2.2 混料配方对黄粉虫幼虫生理指标的影响

不同混料配方对黄粉虫的生理指标的影响见表 3 和 4。从表 3 可知，所有实验组的含水量均在 70% 左右，说明不同饲料配方对黄粉虫体内的水分含量影响不显著。黄粉虫体内灰分含量均较高，但实验组的灰分含量均低于 CK 组。黄粉虫体内粗脂肪含量高于 CK 组的：11 号 > 4 号 > 6 号 > 2 号，说明这几组配方更有利于黄粉虫体内粗脂肪的积累。除实验组 7 号外，其余实验组的粗蛋白含量均高于 CK 组，归因于 7 号的配方中以玉米秸秆为主，而玉米秸秆的蛋白质含量较低，从而使得黄粉虫体内粗蛋白含量较低。在 11 个实验组中，9 个实验组的 SOD 活力均高于 CK 组，4 号饲养的黄粉虫体内的 SOD 活力最高，达到了 320.99 U/g，高于王洪亮等（2011）所测定的幼虫高龄阶段的 SOD 活力，说明复合饲料比单一的常规饲料更有利于提高黄粉虫体内

的 SOD 活力。实验组的总糖含量均低于对照组，表明饲喂秸秆不利于黄粉虫体内总糖的积累。实验组 7 号和 10 号磷含量明显高于其他组，与吉志新等(2011)报道的玉米秸秆有利于黄粉虫体内磷元素积累的研究结论一致，归因于秸秆中含有十分丰富的磷元素。

表 3 不同混料配方对黄粉虫幼虫生理指标的影响

Table 3 Effects of different feed formulation on the physiological indicators of *Tenebrio molitor* larvae

配方编号 Formula no.	含水量(%) Moisture content	灰分含量(%) Ash content	粗脂肪含量(%) Crude fat content	粗蛋白含量(g/100 g FW) Crude protein content	SOD 活性(U/g) SOD activity	总糖含量(%) Total sugar content	磷含量(%) Phosphorus content
1	74.99	6.22	10.06	63.26	131.25	1.95	1.18
2	70.19	5.38	16.48	62.43	111.74	2.48	0.99
3	71.48	5.98	8.22	56.34	200.64	2.27	1.14
4	69.03	5.20	17.41	56.25	320.99	2.87	1.01
5	73.08	5.58	10.45	53.28	204.19	2.10	1.14
6	66.45	5.12	17.35	51.30	262.66	1.85	1.07
7	72.43	4.93	7.44	48.95	274.68	2.07	1.29
8	74.58	4.92	10.31	58.50	139.35	2.34	1.09
9	72.40	6.83	12.12	62.74	261.53	2.47	1.08
10	78.48	5.52	7.74	61.22	267.18	2.33	1.39
11	67.80	5.50	18.07	54.19	235.68	2.04	0.99
CK	63.09	7.58	15.78	49.80	134.30	3.05	1.02

表 4 不同混料配方对黄粉虫幼虫体内中微量元素和重金属含量的影响

Table 4 Effects of different feed formulation on the contents of medium and trace elements and heavy metals in *Tenebrio molitor* larvae

配方编号 Formula no.	中微量元素含量(mg/kg) Content of medium and trace elements					重金属含量(mg/kg) Content of heavy metals	
	Mn	Fe	K	Zn	Cu	Pb	Cr
1	15.30	239.52	4 548.26	173.22	23.22	11.81	8.92
2	13.25	142.43	2 442.56	155.67	15.98	11.71	8.83
3	21.16	132.22	5 791.55	191.68	24.76	11.73	8.68
4	20.23	117.78	1 537.70	159.63	22.08	11.68	8.88
5	15.44	216.11	5 070.59	171.90	23.60	11.68	8.63
6	18.12	113.73	2 906.07	180.64	19.00	11.67	8.84
7	14.22	136.32	2 996.21	209.66	29.02	11.60	8.44
8	10.19	160.86	6 164.94	174.55	22.69	11.73	8.02
9	21.23	142.27	4 767.66	181.69	22.76	11.77	8.89
10	14.63	185.65	6 756.36	224.40	30.59	11.74	8.87
11	20.51	143.00	3 743.75	161.91	21.91	11.61	8.58
CK	15.31	113.96	1 697.20	152.89	21.76	11.79	8.71

由表 4 可知，大部分实验组的中微量元素含量均高于 CK 组，说明饲料中加入秸秆可增加黄粉虫幼虫体内的中微量元素含量。不同混料配方对黄粉虫体内重金属含量的影响不大，所有组别中的重金属(Pb 和 Cr)含量均符合饲料卫生标准(GBT13078-2001)。各项生理指标表明：不同秸秆混料配方对黄粉虫品质无明显影响。

2.3 混料试验结果分析

根据 2.1 节的试验结果，将黄粉虫的生物量增率、死亡率的数据对应地填入表 1 的 C8 和 C9 列，对其进行混料分析。

2.3.1 生物量增率：从 Minitab 的“统计-DOE-混料-分析混料设计”入口，删除不显著变量后得到生物量增率的回归及方差分析(表 5)、四合一残差图 2 和混合等值线图 3。

由表 5 得回归方程：生物量增率 $= -2.725X + 14.310Y + 12.586Z + 95.858XY + 160.752XZ$ ($R = 0.9638$)。“回归项” $P = 0.001$ (<0.05)，表明本模型有效。对四合一残差分析图 2 进行残差诊断后发现：得到的回归方程与数据拟合较好，不需修改。从

生物量增率等值线图 3 可看出：常规饲料、玉米秸秆以及红薯秸秆之间适当比例混合后，可提高黄粉虫的生物量增率；玉米秸秆的量取值较小时，生物量增率较大。

表 5　生物量增率回归及方差分析

Table 5　Regression and variance analysis of biomass increment rate

回归分析 Regression analysis				方差分析 Variance analysis			
项 Item	相关参数 Relevant parameters	P	S 和 R^2 S and R^2	来源 Source	自由度 Degree of freedom	F	P
X	−2.725	*	$S=3.5123$	回归 Regression	4	19.59	0.001
Y	14.310	*	$R^2=92.89\%$	线性 Linear	2	0.92	0.447
Z	12.586	*	$R_1{}^2=88.14\%$	二次 Second time	2	12.01	0.008
XY	95.858	0.022		残差误差 Residual error	6		
XZ	160.752	0.003		合计 Total	10		

* 差异显著 Significant difference ($P<0.05$). R_1：修正后的多元全相关系数 Modified multivariate correlation coefficient.

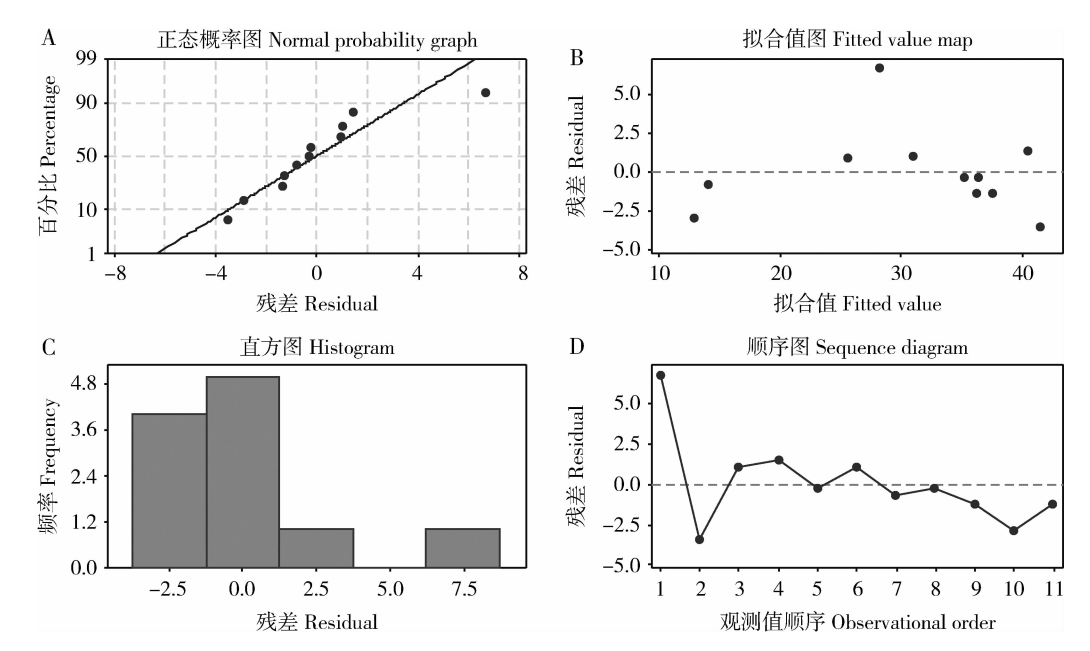


图 2　生物量增率的四合一残差分析图

Fig. 2　Chart of four-in-one residual analysis of biomass increment rate

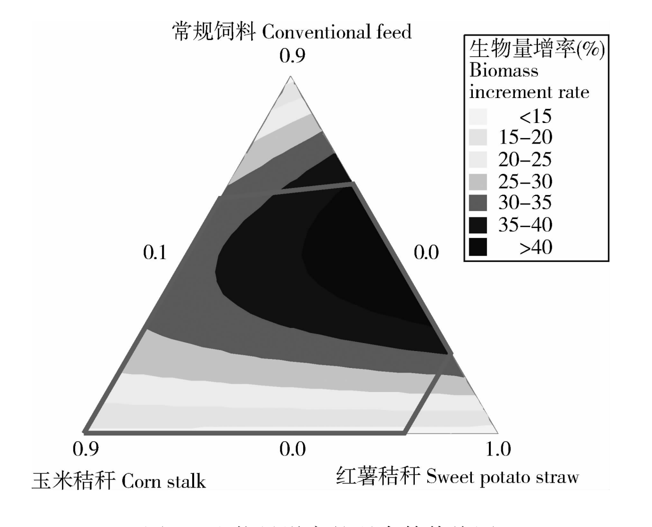


图 3　生物量增率的混合等值线图

Fig. 3　Mixed contour map of biomass increment rate

2.3.2　死亡率：在删除异常值后，得到黄粉虫死亡率的回归方程：死亡率 $=2.065X+2.095Y+4.112Z$ ($R=0.9213$)。从回归方程得出，各因素对死亡率的影响顺序为：红薯秸秆 > 玉米秸秆 > 常规饲料。这是因为红薯秸秆的含水量较高，黄粉虫食用红薯秸秆后，虫体含水量也高（表 3），在其蜕皮或化蛹时，易受其他幼虫咬死或咬伤，从而影响其存活率；此外，过多的水分，也容易滋生病菌，也会导致黄粉虫的死亡率升高（肖银波等，2003）。

2.3.3　响应优化：Minitab 中的响应优化器是解决实验设计中遇到多目标问题的有力工具（Huang *et al.*，2008）。为准确求出黄粉虫生物量增率最大、死亡率最小的设置，从“统计-DOE-混料-响应优化器”进入，按照表 6 设置，得出常规饲料∶玉米秸秆∶红薯

秸秆的比率为0.4438∶0.4562∶0.1000 时,黄粉虫的生物量增率将达到33.80%,死亡率为2.28%,复合合意性为0.5835。

事实上,在实际中会存在一些影响因素,如不同生长阶段、环境温度、湿度、养殖成本等。考虑到这些实际情况,尤其是黄粉虫的养殖成本以及试验目的(以较低的成本使黄粉虫的生物量增率最大),实验组在响应器中设定黄粉虫的生物量增率为40.13%、死亡率为2.93%,此时相对应的常规饲料∶玉米秸秆∶红薯秸秆的比率为0.3724∶0.2072∶0.4204。

表 6 响应优化器设置情况

Table 6 Setting of response optimization

响应 Response	目标 Target	下限 Lower limit	期望目标 Desired goal	上限 Upper limit	权重 Weight factor	重要性 Importance
生物量增率 Biomass increment rate (%)	期望最大值 Expected maximum	10	50		1	1
修正死亡率 Modified mortality (%)	期望最小值 Expected minimum		1	4	1	1

2.4 混料配方优化验证

为确定最终的混料配方,选择效果较好的3组进行优化验证。N1是2.3.3节优化的结果;N2和N3是混料实验中生物量增率较高的两组(配方编号2和4)。饲养20 d后,黄粉虫的部分生长、生理指标见表7。

从表7可知,N1的生物量增率和饲料利用率最高,而CK组最低。归因于秸秆中含有一定的糖类、蛋白、纤维素和丰富的维生素等微量元素,丰富了饲料的营养配比,增加了黄粉虫的摄食量。生理指标方面,3组实验组的含水量、粗蛋白含量相差甚微,同CK组相差也不大,表明实验组的混料配比不影响黄粉虫的生长品质。考虑到N1配方的饲料成本最低,仅为0.90元/kg,相比于常规饲料的成本降低了56.94%,故确定N1配方为最终的混料配方。

表 7 验证响应优化器的混料配方

Table 7 Verification of the feed formulation of the response optimization

混料配方编号 Feed formulation no.	常规饲料占比(%) Proportion of conventional feed	玉米秸秆占比(%) Proportion of corn stalk	红薯秸秆占比(%) Proportion of sweet potato straw	饲料成本(元/kg) Feed cost (yuan/kg)	生长指标 Growth indicators: 生物量增率(%) Biomass increment rate	死亡率(%) Mortality rate	饲料利用率(%) Feed utilization rate	饲料转化率(%) Feed conversion rate	生理指标 Physiological indicators: 含水量(%) Moisture content	粗蛋白含量(g/100 g FW) Crude protein content
N1	37.24	20.72	42.04	0.90	32.52	0.600	30.13	60.94	61.85	45.70
N2	45.70	14.06	40.23	1.05	30.04	0.798	27.13	53.40	61.72	46.12
N3	62.94	0	37.06	1.36	27.79	0.599	24.70	58.49	62.21	45.13
CK	100	0	0	2.09	25.17	0.998	22.60	72.04	59.80	48.25

3 讨论

将常规饲料、发酵玉米秸秆、发酵红薯秸秆三者混合后养殖黄粉虫,利用Minitab软件进行极端顶点混料试验设计、优化及验证,确定了最佳混料配方:常规饲料37.24%、发酵玉米秸秆20.72%、发酵红薯秸秆42.04%。此配方饲养的黄粉虫生物量增率达32.52%(常规饲料仅为25.17%),饲料利用率高且死亡率低,黄粉虫品质无明显差异。本研究用极端顶点法设计、配制的饲料,其组合方式、效果、饲养成本优于文献报道(徐世才等, 2013),而该法在多组分、约束条件下的饲料配方研究中鲜有应用。该研究既拓展了秸秆的资源化利用途径,减少了资源浪费和环境污染等问题,又降低了黄粉虫的饲料成本,可被推广使用。

据报道,玉米秸秆发酵处理后用于养殖黄粉虫是可行的(吉志新等, 2011; 吕树臣等, 2013; 徐世才等, 2013; 王春清等, 2013),但仍有诸多问题有待进一步探讨与解决。首先,不能仅限于玉米秸秆,薯类、油菜、棉花、水稻等其他农作物秸秆也可以考虑加以利用。特别是红薯秸秆,含有蛋白质、还原

糖、粗纤维、灰分、维生素等十多种营养成分,可以丰富饲料的营养配比。其次,作物秸秆具有一定的季节性,应在秸秆收获期加紧发酵处理并储藏。再次,黄粉虫幼虫食用新配方饲料之前需一定的适应期,养殖户应逐步加大秸秆饲料的投料量。最后,黄粉虫食用秸秆后残留一部分木质层,给幼虫的分离带来一定的困难,在今后的研究中需要重点解决这一问题;建议可将木质层作为腐殖酸、生物有机肥的原料,以实现秸秆资源最大化利用。

参考文献（References）

Chu TS, Yang ZL, Han LJ, 2016. Analysis on satisfied degree and advantage degree of agricultural crop straw feed utilization in China. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 32(22): 1–9.［楚天舒, 杨增玲, 韩鲁佳, 2016. 中国农作物秸秆饲料化利用满足度和优势度分析. 农业工程学报, 32(22): 1–9］

Dong HS, Chen B, 2009. Activity determination of superoxide dismutase based on revised Marklund method. *Storage Process* (1): 27–29.［董海胜, 陈斌, 2009. 利用修改的 Marklund 方法测定 SOD 活性. 保鲜研究, (1): 27–29］

Gu JP, Hu J, Zhou LJ, Chen JY, Hu YL, Li GK, Zeng ZX, 2015. Determination of total amount of heavy metals by atomic absorption spectrometry and their speciation analysis in tobacco. *J. Instr. Anal.*, 34(1): 111–114.［古君平, 胡静, 周朗君, 陈静夷, 胡玉玲, 李攻科, 曾尊祥, 2015. 原子吸收光谱法测定烟叶中的重金属总量及形态分析. 分析测试学报, 34(1): 111–114］

Guo ZZ, Xu LM, Wu HZ, Xu L, 2017. Utilization of corn straw in animal husbandry production. *Anim. Husb. Vet. Med.*, 49(7): 133–136.［郭照宙, 许灵敏, 武洪志, 许丽, 2017. 玉米秸秆在畜禽生产中的利用. 畜牧与兽医, 49(7): 133–136］

Halidai RHMJ, Aibibula YMM, Reshalaitihan MMT, 2016. The cotton stalk and its utilization as ruminant feed resource in Xinjiang. *Asian Agric. Res.*, 8(9): 90–94.

Huang S, Zhou JZ, Sun YQ, Chen YB, Jiang SQ, 2008. Numerical simulation and response optimizer design of strengthening effects induced by laser shock peening. *Mater. Sci. Forum*, 575–578: 373–378.

Ji ZX, Wen XL, Yu JY, Song JC, Wang Z, Qi HX, Hu ZY, Li LP, Li HC, 2011. Effects of feeding corn stalks on economic indicators of *Tenebrio molitor*. *J. Anhui Agric. Sci.*, 39(33): 20520–20522.［吉志新, 温晓蕾, 余金咏, 宋金昌, 王哲, 齐慧霞, 胡振妍, 李丽萍, 李汉臣, 2011. 喂食玉米秸秆对黄粉虫经济指标的影响. 安徽农业科学, 39(33): 20520–20522］

Jiang HW, Shi GF, Zhao T, Xin YP, 2017. Effect of corn stalks treated by wood vinegar on feeding in beef cattle. *Chin. Cattle Sci.*, 43(4): 34–36.［蒋宏伟, 时国峰, 赵拓, 辛亚平, 2017. 木醋液处理玉米秸秆及其饲喂肉牛效果. 中国牛业科学, 43(4): 34–36］

Li N, Li T, Shao CB, Lin B, Su X, Mao F, 2014. A method of preparing feed of *Tenebrio molitor* larvae from corn stalks. China Patent: CN103719633A, ZL201410015839.2. Issuing date: 2016.01.20.［李宁, 李涛, 邵承斌, 林兵, 苏香, 毛飞, 2014. 一种用玉米秸秆制备黄粉虫幼虫饲料的方法. 中国专利: CN103719633A, ZL201410015839.2. 授权日期: 2016.01.20］

Li N, Xing HW, Xiong XL, 2017. Exploitation and utilization of *Tenebrio molitor* resources. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing.［李宁, 幸宏伟, 熊晓莉, 2017. 黄粉虫资源化开发与利用. 北京: 中国农业科学技术出版社］

Lv SC, Wang CQ, Ma ML, Ding XW, 2013. Effect of fermented corn stalks on the performance of *Tenebrio molitor* larvae. *Anim. Husb. Vet. Med.*, 45(5): 42–44.［吕树臣, 王春清, 马铭龙, 丁秀文, 2013. 发酵玉米秸秆对黄粉虫幼虫生产性能的影响. 畜牧与兽医, 45(5): 42–44］

Sun Y, Liu J, Liu JJ, Xin LD, Tian SG, 2008. Determination of the total sugar in chicory roots by phenol-sulfuric acid method. *Chin. J. Ethnomed. Ethnoph.*, (4): 12–13.［孙芸, 刘杰, 刘佳佳, 辛禄德, 田树革, 2008. 苯酚-硫酸法测定菊苣根中总糖的含量. 中国民族民间医药, (4): 12–13］

Wang CJ, Xiong XL, Li T, Zhang XB, Li N, 2015. *Tenebrio molitor* was raised by fermented corn stalk. *Feed Res.*, (11): 66–69.［王崇均, 熊晓莉, 李涛, 张小彬, 李宁, 2015. 发酵玉米秸秆饲养黄粉虫. 饲料研究, (11): 66–69］

Wang CQ, Ma ML, Ding XW, Lv SC, 2013. Effect of different proportion of wheat bran and corn straw on the growth performance in yellow powder larva. *Chin. Anim. Husb. Vet. Med.*, 40(1): 210–212.［王春清, 马铭龙, 丁秀文, 吕树臣, 2013. 不同比例麦麸和玉米秸秆对黄粉幼虫生长性能的影响. 中国畜牧兽医, 40(1): 210–212］

Wang HL, Wang BL, Li WH, Wang GC, Wei YL, 2011. Effect of Cu^{2+} on protective enzymes activity of *Tenebrio molitor* Linnaeus larvae. *Guangdong Agric. Sci.*, 38(23): 129–131.［王洪亮, 王丙丽, 李卫海, 王国昌, 魏艳丽, 2011. 铜胁迫对黄粉虫幼虫 3 种保护酶活性的影响. 广东农业科学, 38(23): 129–131］

Xiao YB, Zhou ZJ, Yang W, Du KS, 2003. The effects of different ecological factors on rearing efficiency of *Tenebrio molitor* L. *Acta Ecol. Sin.*, 23(4): 673–680.［肖银波, 周祖基, 杨伟, 杜开书, 2003. 饲养条件对黄粉虫幼虫生长及存活的影响. 生态学报, 23(4): 673–680］

Xiang XL, Luo LL, Dang FM, Wang J, 2015. Research and improvement of determination for phosphorus in food by molybdenum blue spectrophotometry. *J. Anhui Agric. Sci.*, 43(8): 244–245.［向晓黎, 罗力力, 党富民, 王静, 2015. 钼蓝分光光度法测定食品中磷的研究及改进. 安徽农业科学, 43(8): 244–245］

Xu SC, Liu XW, Wang Q, Shen XJ, 2013. *Tenebrio molitor* L. feed production from fermentation of corn stalks. *Acta Agric. Bor.-Occid. Sin.*, 22(1): 194–199.［徐世才, 刘小伟, 王强, 沈雪健, 2013. 玉米秸秆发酵制取黄粉虫饲料的研究. 西北农业学报, 22(1): 194–199］

（责任编辑：赵利辉）